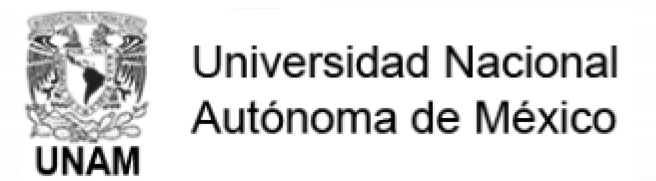




SEMINARIO SOBRE :

"TRANSPORTE DE SEDIMENTOS"

TEMA 1: INTRODUCCIÓN A LA HIDRÁULICA FLUVIAL

Presenta: Dr. Pedro Guido Aldana

pedroguido@tlaloc.imta.mx

20 Junio de 2014

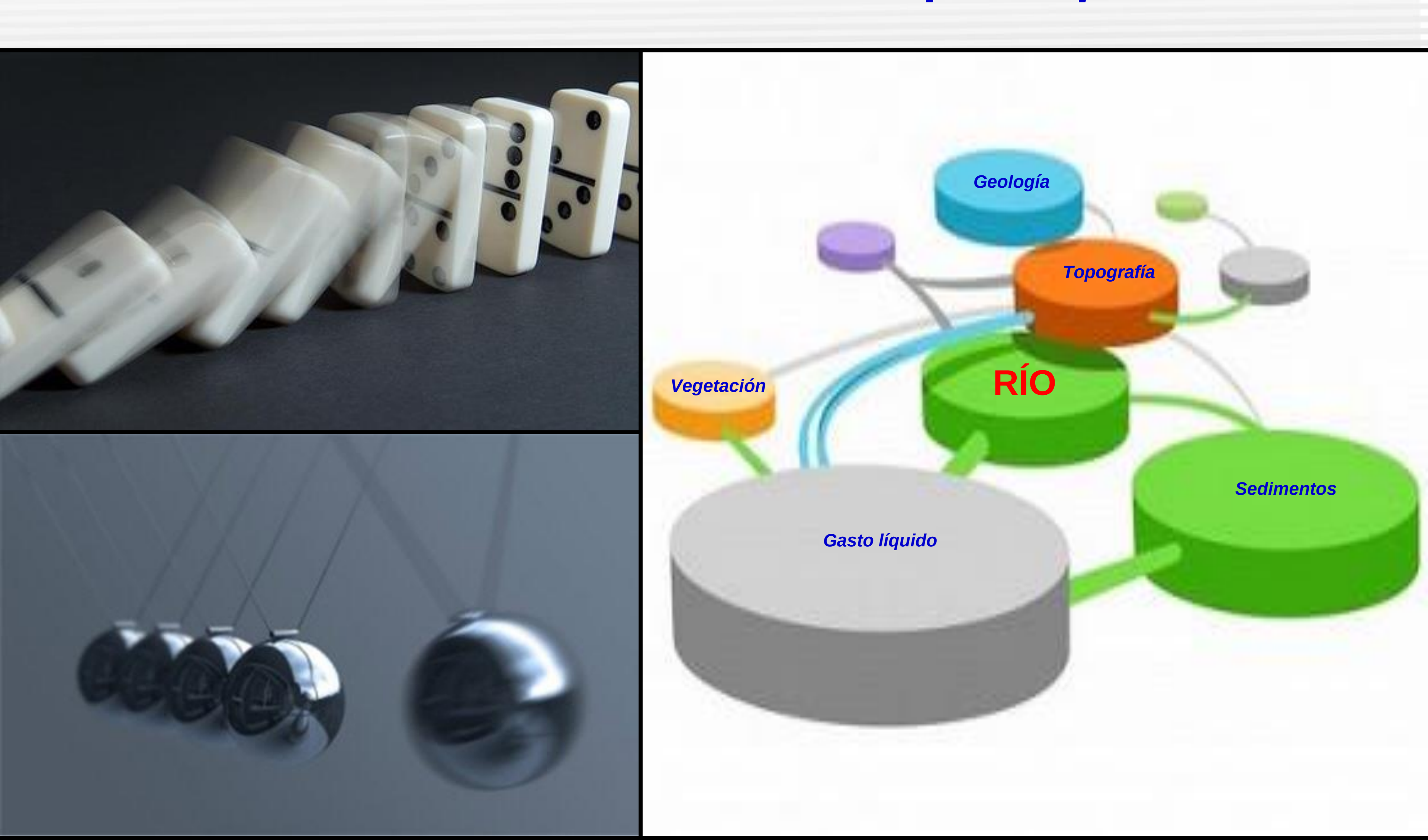




0. INTRODUCCIÓN

A toda acción….

Enfoque u óptica…?



(TEMA 1)
OBJETIVO

Situar a los asistentes al seminario en el contexto de la hidráulica fluvial, describiendo sus partes más relevantes y haciendo énfasis en su importancia para la planeación y diseño de obras hidráulicas enfocadas al control de inundaciones.





CONTENIDO

0. Introducción.

1. Clasificación de ríos.

2. Morfología de llanuras de inundación.

3. Equilibrio de fondo. *Analogía de Lane*.

4. Principio de movimiento y transporte.

5. Gasto formativo.

6. Acorazamiento.

7. Estabilidad de márgenes

8. Procesos erosivos y de transporte.





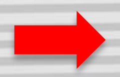
0. HIDRÁULICA FLUVIAL/DEFINICIÓN

RAMA DE LA HIDRÁULICA QUE ESTUDIA EL FLUJO DE AGUA EN LOS CANALES NATURALES.

- **Estudia el comportamiento hidráulico de los ríos en lo que se refiere a los caudales y niveles medios y extremos, las velocidades de flujo, las variaciones del fondo por socavación y sedimentación, la capacidad de transporte de sedimentos y los ataques contra las márgenes.**

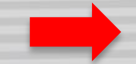
- **Combina conceptos: Hidrología, Hidráulica General, Geomorfología, Transporte de sedimentos.**





- **Trata de las intervenciones humanas en los ríos para su adecuación y aprovechamiento, así como la reducción de los riesgos de daños.**

POTAMOLOGÍA



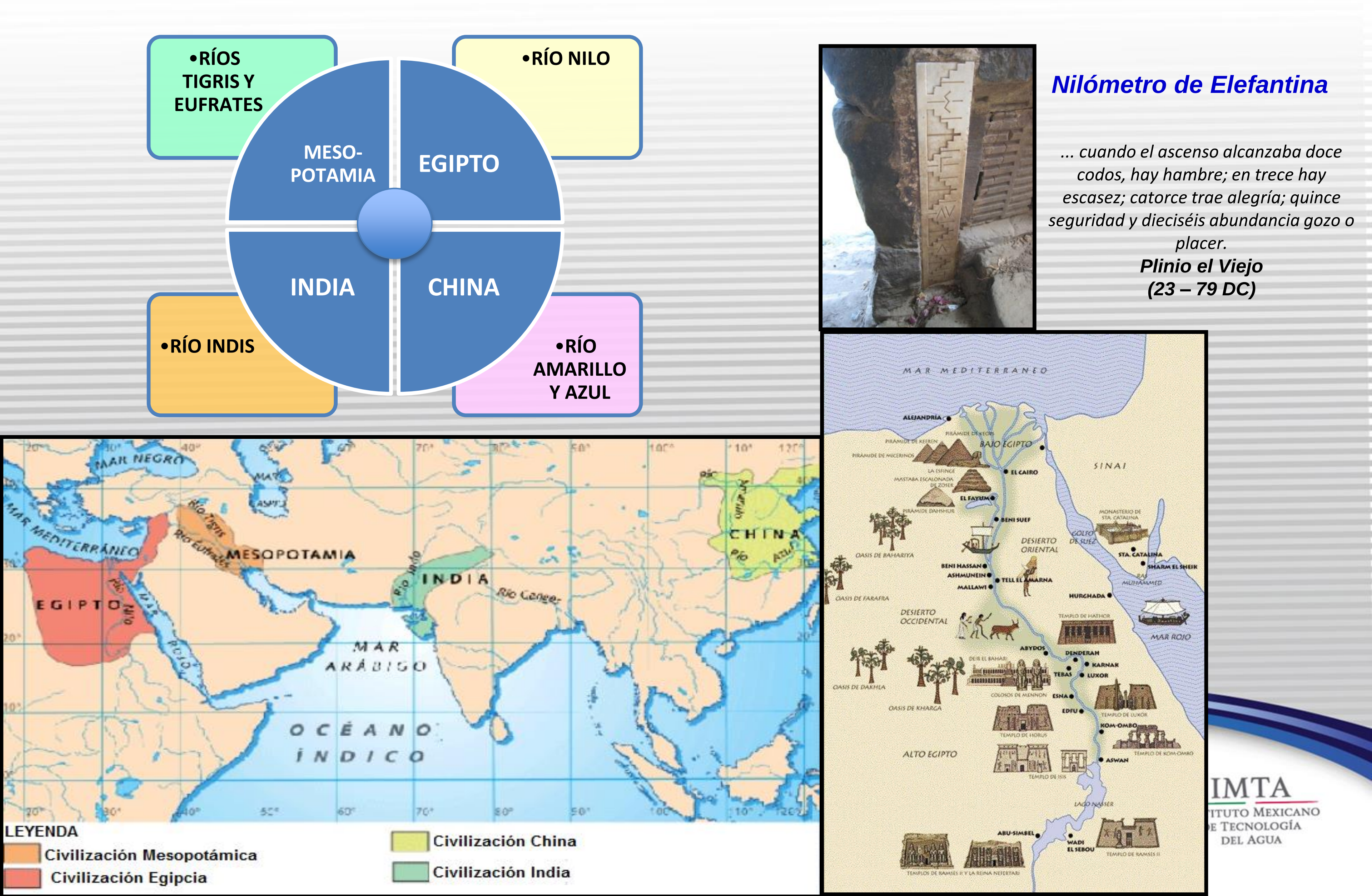
- **Estudio científico de los ríos.**
- Integra la aplicación de diferentes disciplinas relacionadas con el estudio y comportamiento morfológico de los ríos.
- **Requiere un trabajo multidisciplinario:**

Hidrología, hidráulica, geología, geomorfología, geotecnia, sedimentología (erosión, transporte y depósito de sedimento), ordenamiento territorial…

OBRAS FLUVIALES – OBJETIVO:

- ✓ **Control de gastos líquido y sólido.**
- ✓ Control del cauce en sus tres grados de libertad (ancho, tirante y pendiente) .
- ✓ **Aprovechamiento del recurso hídrico.**
- ✓ Favorecer la navegación.

0. HIDRÁULICA FLUVIAL/COMENTARIOS GENERALES



0. HIDRÁULICA FLUVIAL/DEFINICIÓN

- **No se trata solamente de manejar el AGUA, sino también el SEDIMENTO.**
- **Es muy importante (y crítico) poder predecir la "respuesta" del sistema fluvial a la intervención humana, tomando en cuenta la tendencia natural ya existente en diferentes escalas de tiempo (corto, mediano y largo plazo).**



ELABORACIÓN DE PROYECTOS EJECUTIVOS:

- **Topografía y/o batimetría**
- **Hidrología**
- **Hidráulica Fluvial**
- **Geotecnia**
- **Bancos de materiales**
- **Modelos matemáticos**
- **Modelos físicos**
- **Diseño estructural**
- **Tenencia de la Tierra**
- **……**

❖ ***"PROYECTOS INTEGRALES"***

EMARNAT
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES





1. CLASIFICACIÓN DE RÍOS

La diversidad de ríos es virtualmente infinita… no existen dos lugares iguales en clima, relieve, geología, hidrología, ….

Criterios usuales:

- ***RÉGIMEN HIDROLÓGICO***
- ***PENDIENTE***
- ***ASPECTOS MORFOLÓGICOS***

Ingeniería de ríos. JP Martín Vide.





1. CLASIFICACIÓN DE RÍOS/CONTINUACIÓN

RÉGIMEN HIDROLÓGICO

- ***CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA***
- ***PRECIPITACIONES***

EFÍMEROS →

Aquellos que solo conducen agua en episodios de fuertes precipitaciones. (opuestos a perennes). ***Típicos en climas áridos y semiáridos.***

ALUVIALES →

Aquellos que escurren ***llevando una carga de sedimentos generalmente aportados por el propio río****. Su lecho tiene un espesor de material granular prácticamente suelto.* ***Mayores problemas en ingeniería fluvial.***

Ingeniería de ríos. JP Martín Vide.





Ejemplos de ríos aluviales…



RÍO HUIXTLA, CHIAPAS, MÉXICO.

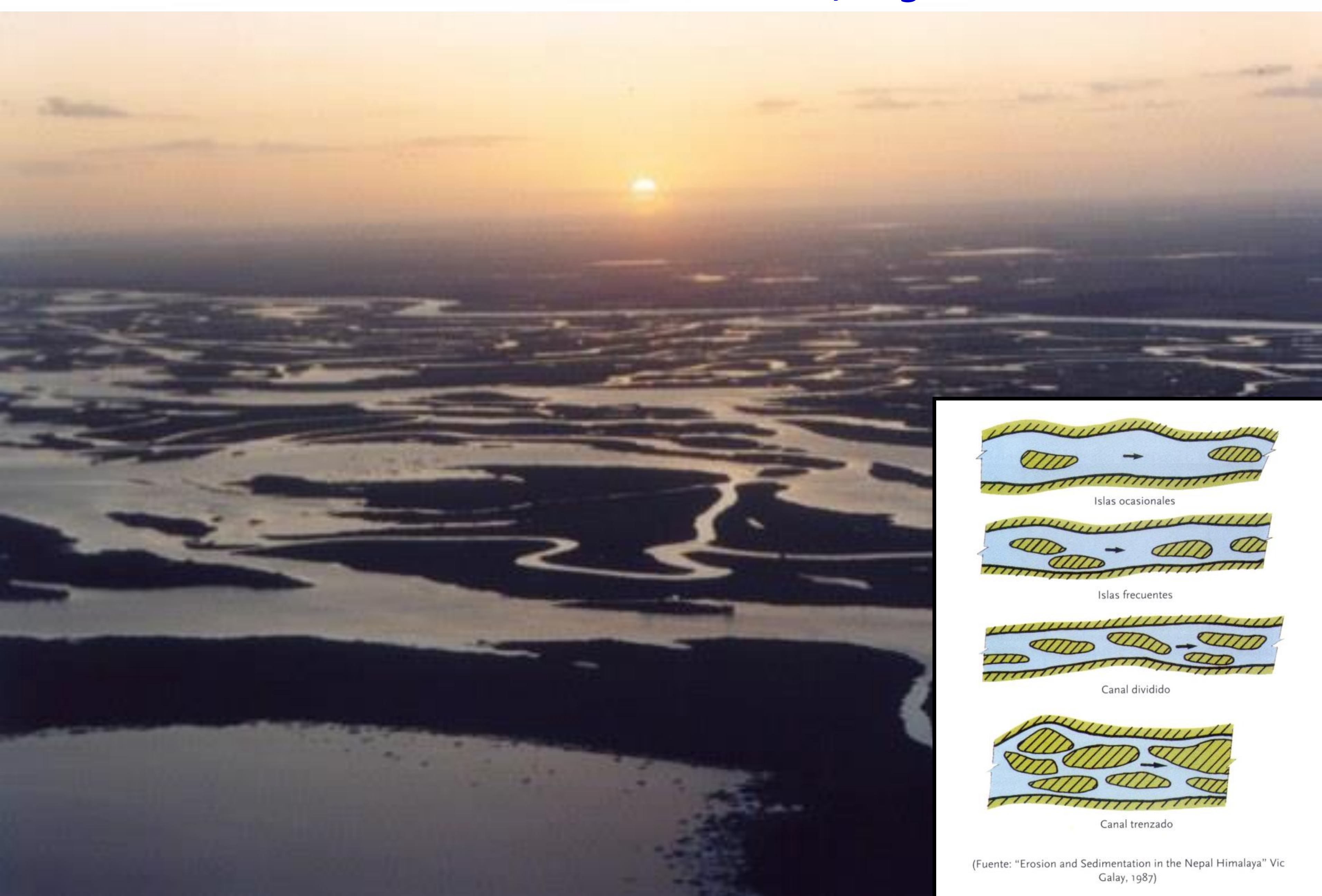


RÍO ORINOCO, VENEZUELA.





Valle aluvial en el río Paraná, Argentina



1. CLASIFICACIÓN DE RÍOS/CONTINUACIÓN

PENDIENTE (S)

Establece la diferencia más importante en cuanto al régimen hidráulico.

TORRENCIALES: *S > 1.5%*

TORRENTES: *S > 6%*

DE MONTAÑA	DE LLANURA	DE GRAVA	DE ARENA

Ingeniería de ríos. JP Martín Vide.

ÁSPECTOS MORFOLÓGICOS

EDAD	CONDICIÓN DE ESTABILIDAD	MATERIAL DE MÁRGENES Y FONDO	GEOMETRÍA	CONDICIÓN DE TRANSPORTE
JÓVENES • *Cauces de montaña* • *Pendientes altas* • *Sección transversal en "v"* ***MADUROS*** • *En valles amplios* • *Pendientes interm. a bajas* ***VIEJOS*** • *En planicies cuyo ancho del río es 15 a 20 veces mayor que el ancho de los meandros.* • *Pendientes <<<*	***ESTÁTICA*** • *Arrastra sedimentos, pero no mueve los elementos de las orillas.* ***DINÁMICA*** • *Arrastra sedimentos del fondo y de las orillas.* • *La pendiente y la sección no cambian apreciablemente año con año.*	***COHESIVOS*** •*Alojados en material arcilloso.* ***NO COHESIVOS*** •*Partículas sueltas; acorazados (capa gruesa en su superficie).*	• *Rectos sinuosos, con meandros.* • *Trenzados, con islas, en estuario, pantanos o deltas.*	• *Los tramos de los ríos pueden estar sujetos a un proceso de erosión, sedimentación o en equilibrio.*

Manual para el control de inundaciones. CONAGUA. 2011

1. CLASIFICACIÓN DE RÍOS/CONTINUACIÓN

DE MONTAÑA…

V

S >>>



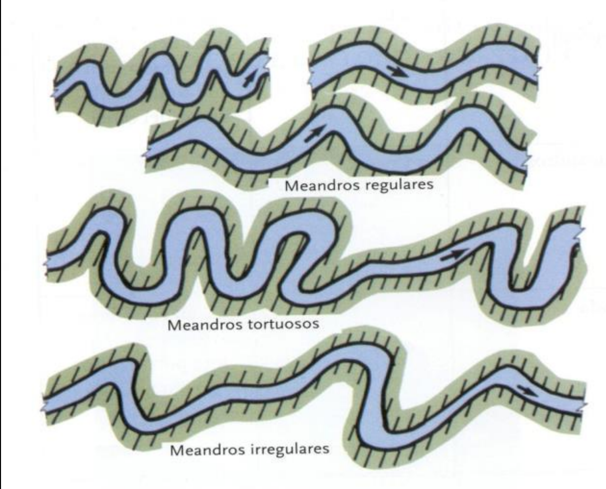


1. CLASIFICACIÓN DE RÍOS/CONTINUACIÓN

DE LLANURA, MEÁNDRICOS…







Meandros: Se forman por erosión de la margen externa (convexa) y sedimentación en la margen interna (cóncava); pueden ocurrir cortes de meandro, que dejan brazos muertos ("*oxbow lakes*").



1. CLASIFICACIÓN DE RÍOS/CONTINUACIÓN

DE LLANURA, MEÁNDRICOS, CON BARRAS E ISLAS…



1. CLASIFICACIÓN DE RÍOS/CONTINUACIÓN

DE GRAVA…



1. CLASIFICACIÓN DE RÍOS/CONTINUACIÓN

DE ARENA…

EXTRACCIÓN ILEGAL…

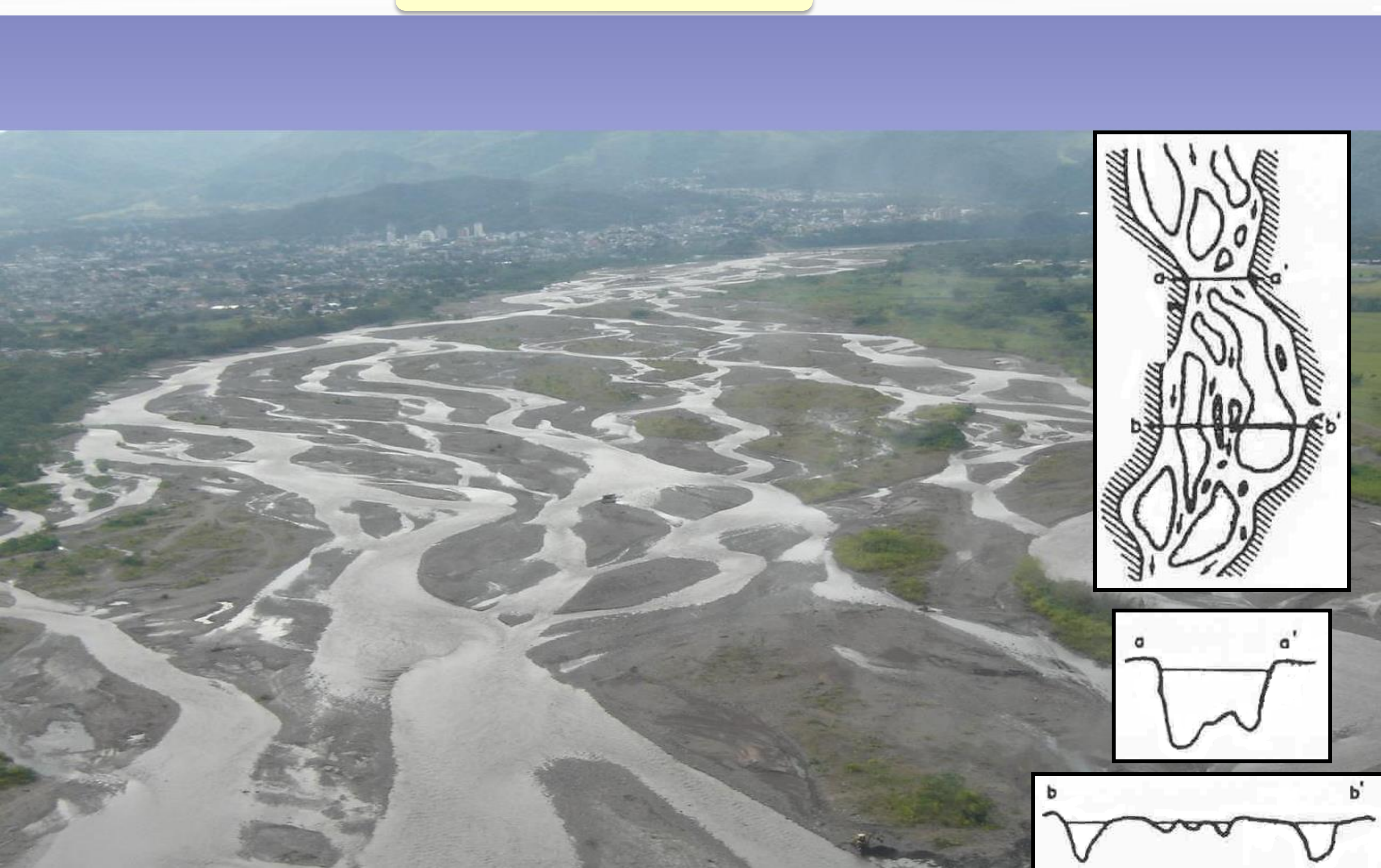






1. CLASIFICACIÓN DE RÍOS/CONTINUACIÓN

TRENSADO CON ISLAS…



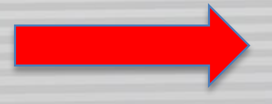
2. MORFOLOGÍA DE LLANURAS DE INUNDACIÓN

Definición: son las áreas próximas al cauce principal de un río que resultan ocasionalmente inundadas.

El proceso dominante es: la sedimentación.

Caso más común: ríos de poca pendiente con morfología meandriforme.

- ✓ *Por su larga historia pueden acumular restos de **cauces extintos**, **paleocauces, meandros cortados, dando así multiplicidad de lugares altos y depresiones.***
- ✓ ***Formación sedimentaria.***
- ✓ *Suelos muy variados. En ríos de llanura: los primeros depósitos son de material muy fino (arcillas), en los lugares de menor velocidad. En el fondo encontramos gravas.*



❖ ***Acreción vertical – acreción lateral***

Ingeniería de ríos. JP Martín Vide.

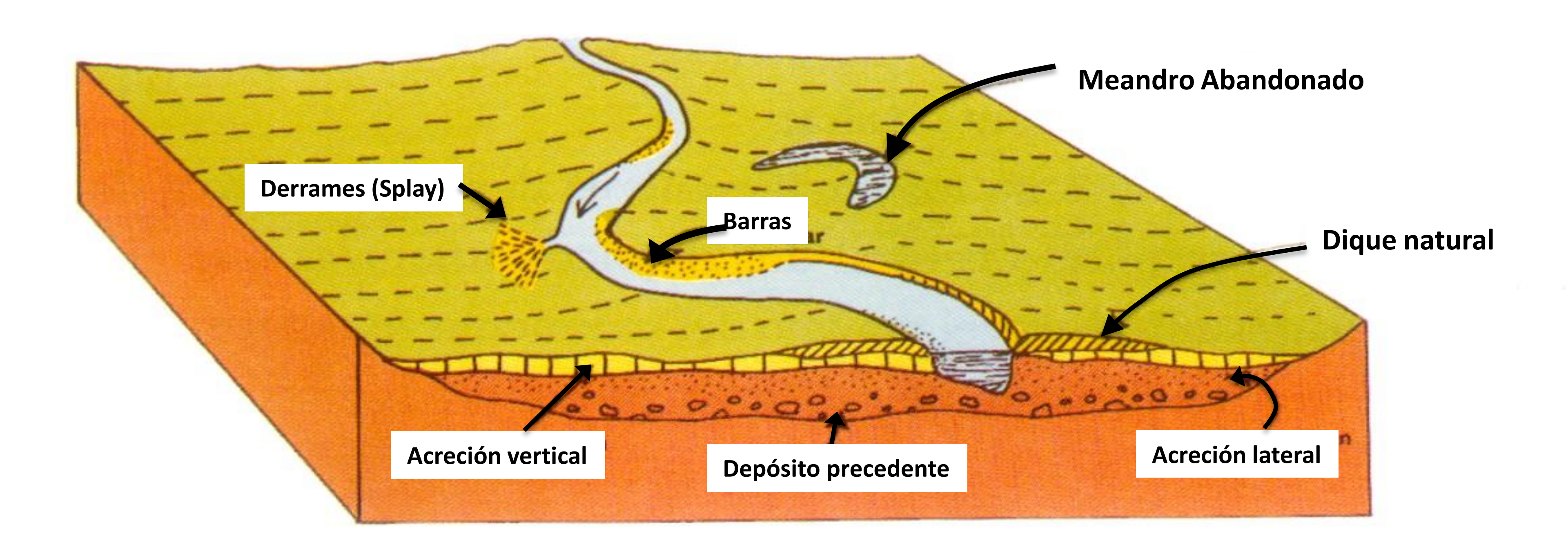




2. MORFOLOGÍA DE LLANURAS DE INUNDACIÓN/CONTINUACIÓN

Identificación de los rasgos principales de un cauce en la planicie.

Depósitos típicos en planicies de inundación



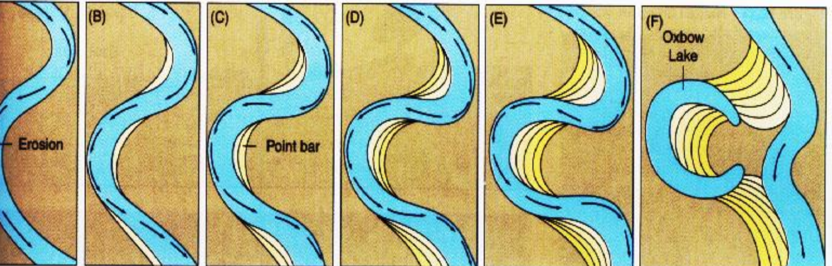
(Fuente: "Erosion and Sedimentation in the Nepal Himalaya"
Vic Galay, 1987)

2. MORFOLOGÍA DE LLANURAS DE INUNDACIÓN/CONTINUACIÓN

Sedimentación
Barras

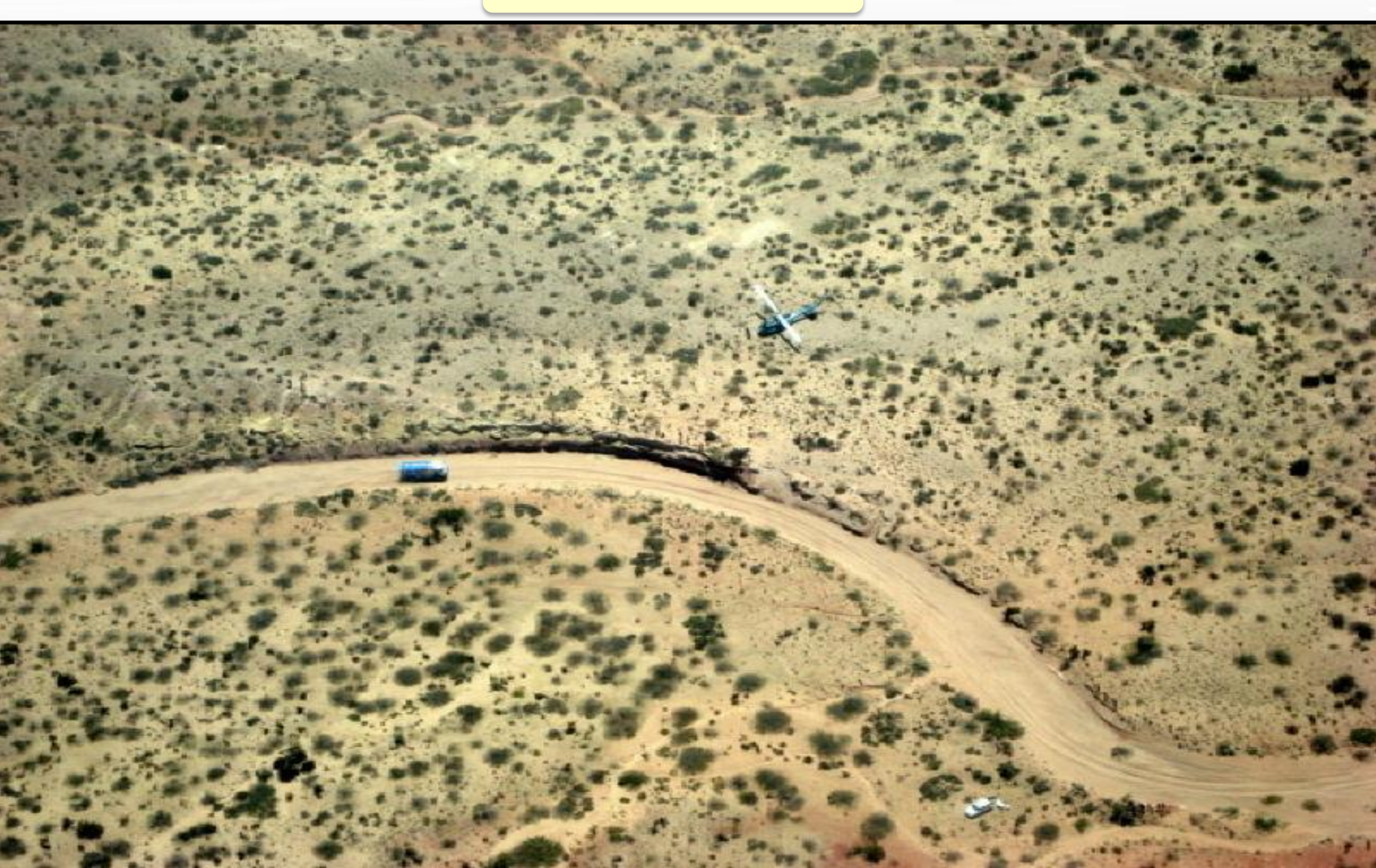
Meandros abandonados en la llanura del río Amazonas.

- ✓ En algunos de ellos aún hay agua.
- ✓ **Otros, aunque ya secos, pueden distinguirse por el color de la nueva vegetación que los coloniza y su forma curva.**
- ✓ También se hace muy evidente la sedimentación en las orillas internas de los meandros, en los que aparece una barra clara de arena.



2. MORFOLOGÍA DE LLANURAS DE INUNDACIÓN/CONTINUACIÓN

Paleocuace



2. MORFOLOGÍA DE LLANURAS DE INUNDACIÓN/CONTINUACIÓN



Río Waimakariri, llanuras de Canterbury, isla sur de Nueva Zelanda

2. MORFOLOGÍA DE LLANURAS DE INUNDACIÓN/CONTINUACIÓN

Derrames (*Splay*)



2. MORFOLOGÍA DE LLANURAS DE INUNDACIÓN/CONTINUACIÓN

Avulsión. Cambio brusco del escurrimiento de un cauce por "rompido". Formación de un nuevo río.

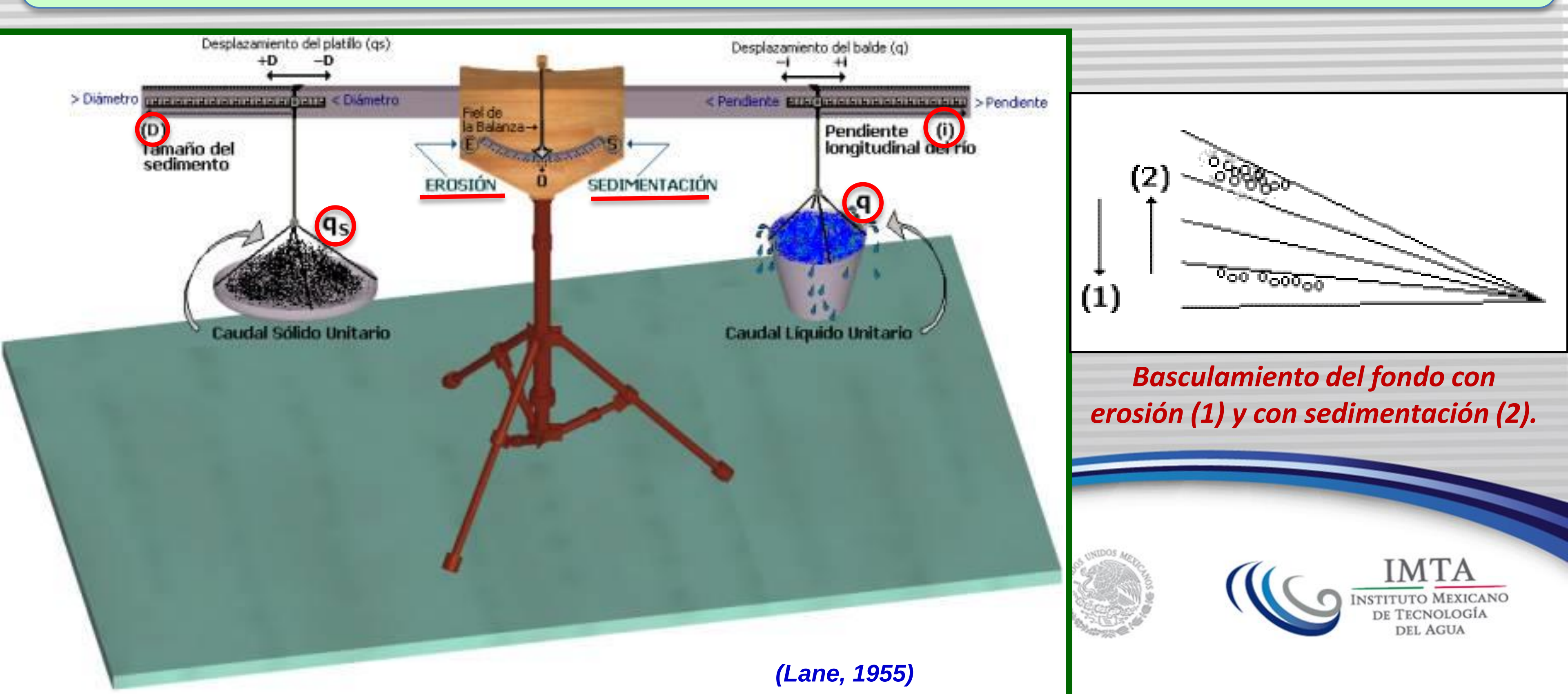


3. EQUILIBRIO DE FONDO - ANALOGÍA DE LANE

Además de observar la planta y las secciones de un río, debemos fijarnos en su perfil longitudinal.

- Podemos afirmar que el fondo de un río se encuentra en equilibrio en presencia de transporte de sedimentos, cuando no sufre modificación en su perfil.

La analogía de la balanza es una herramienta muy útil para analizar el desequilibrio de un río, en particular por causa de una intervención humana.



Basculamiento del fondo con erosión (1) y con sedimentación (2).

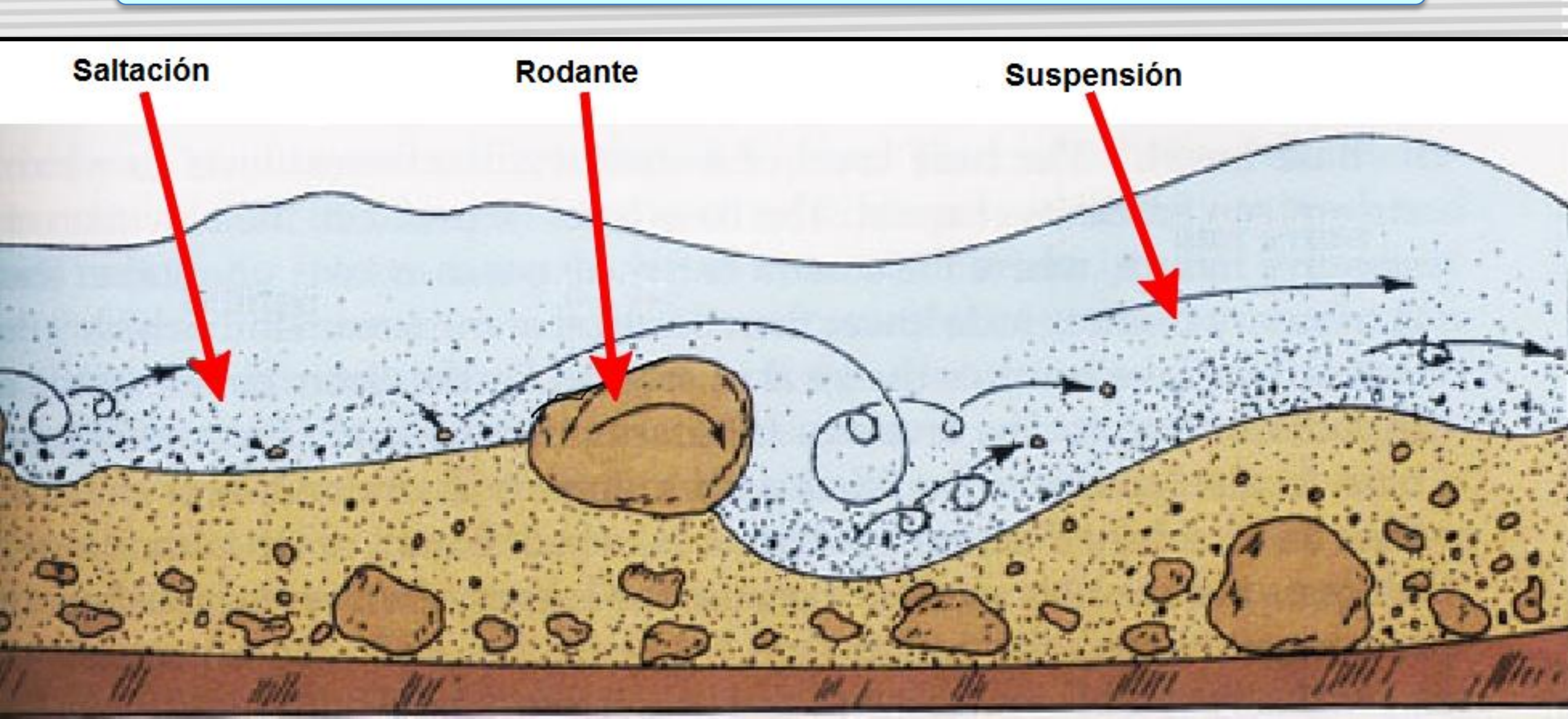
(Lane, 1955)

4. PRINCIPIO DE MOVIMIENTO Y TRANSPORTE

- Un lecho granular que soporta la circulación de una corriente de agua verá en algún momento desplazada una partícula por la fuerza del arrastre de agua. Saber en qué condiciones ocurre esto es un problema del **umbral, principio, o condición crítica del arrastre o movimiento de fondo**, con gran implicación práctica sobre la erosión del fondo.

- **El conocimiento que se tiene proviene principalmente de ensayos de laboratorio con arenas uniformes.**

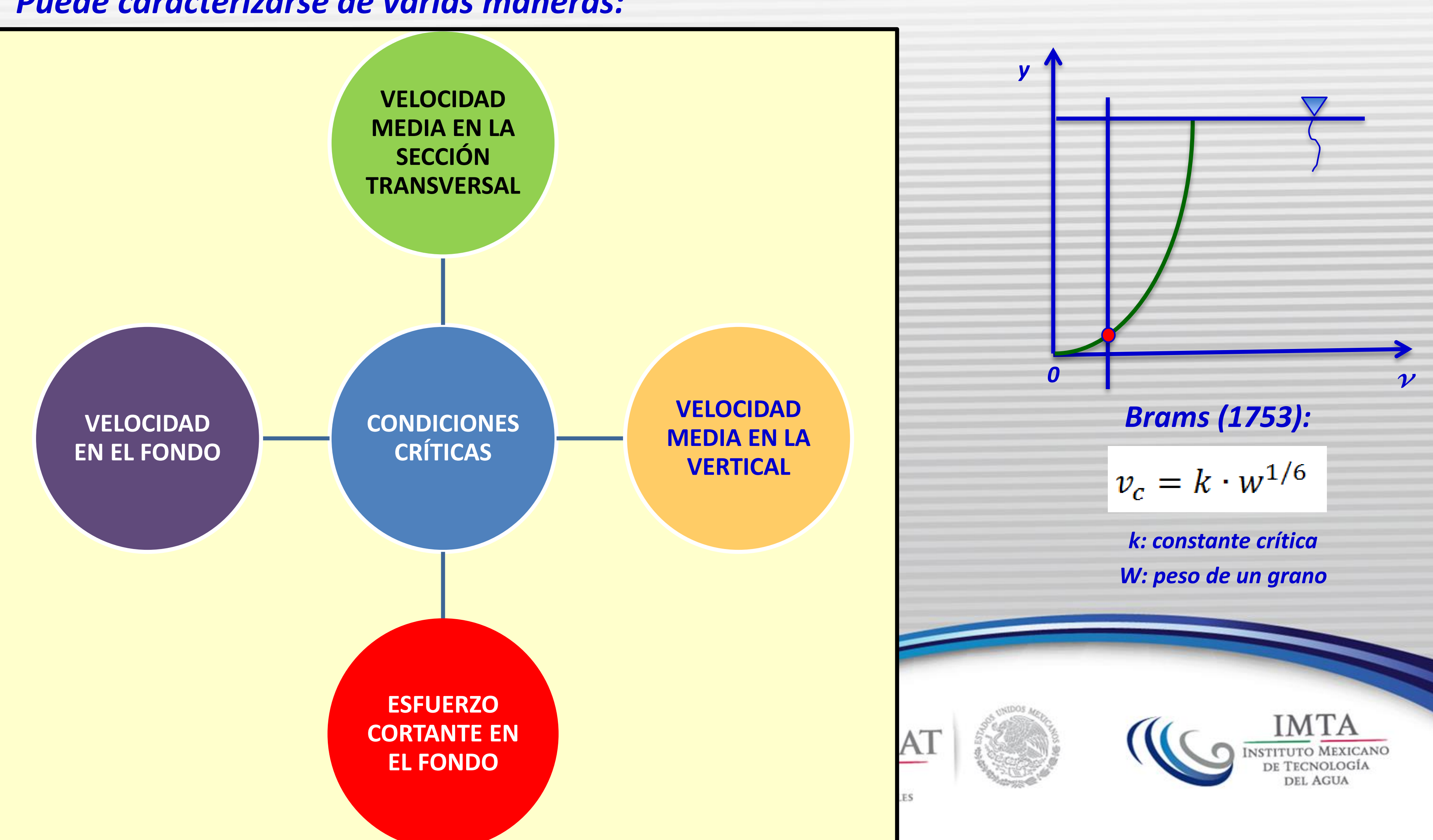
Parece existir un consenso en torno al resultado conocido como ábaco de Shields (1936).



CONDICIONES CRÍTICAS:

"Cuando comienza a darse arrastre de sedimentos".

Puede caracterizarse de varias maneras:



4. PRINCIPIO DE MOVIMIENTO Y TRANSPORTE/CONTINUACIÓN

Si: *MOMENTO RESISTENTE* < *MOMENTO GENERADO POR LAS FUERZAS DE ARRASTRE*



Conviene hacer un análisis mecánico…

F_L

F_D

+

W

θ

u

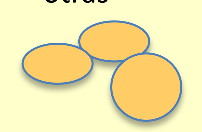
Suponiendo que la partícula es esférica….

$$M_R = (\gamma_s - \gamma)\frac{\pi\, D^4}{12} sin\theta$$

$$M_A = \beta \frac{\tau\, \pi\, D^3}{8} cos\theta$$

$$\beta = \beta(\vartheta, D, u_*)$$

β : corrige la forma cómo se acomodan las partículas unas con otras



4. PRINCIPIO DE MOVIMIENTO Y TRANSPORTE/CONTINUACIÓN

τ_c : Es el esfuerzo crítico y produce el movimiento incipiente de la partícula

Para que se de el movimiento incipiente: $\mathbf{M_A = M_R}$

$$\tau_c = K(\gamma_s - \gamma)D$$

$$K = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)D}$$

Parámetro de Shields o esfuerzo cortante adimensional

La acción del agua sobre el fondo puede representarse por **una velocidad característica llamada velocidad de corte v***. Esta velocidad se define convencionalmente a partir de la tensión τ como $\tau = \rho v_*^2$ o también:

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$$

v_* como velocidad significativa para el fondo, es la más indicada para constituir un **número de Reynolds llamado granular**, definido como:

$$Re_* = \frac{v_* D}{\vartheta}$$







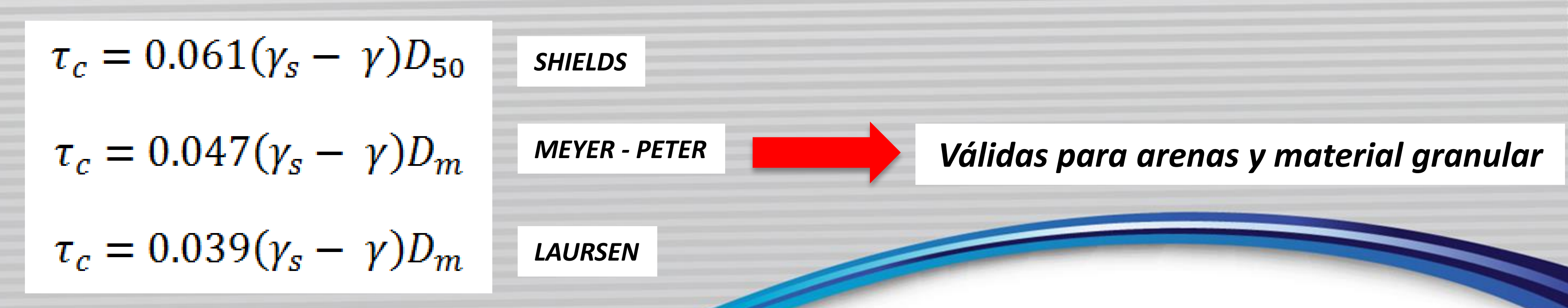
4. PRINCIPIO DE MOVIMIENTO Y TRANSPORTE/CONTINUACIÓN

$$K = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)D}$$

1
0.1
.08
.06
.04
.02
0.01
RIZOS
DUNAS
LECHO PLANO
0.056
REPOSO
2 4 6 8
1 10 100 1000

$$Re_* = \frac{v_* D}{\vartheta}$$

El esfuerzo adim. K debe alcanzar el valor en la ordenada, para cada abscisa, para iniciar movimiento.





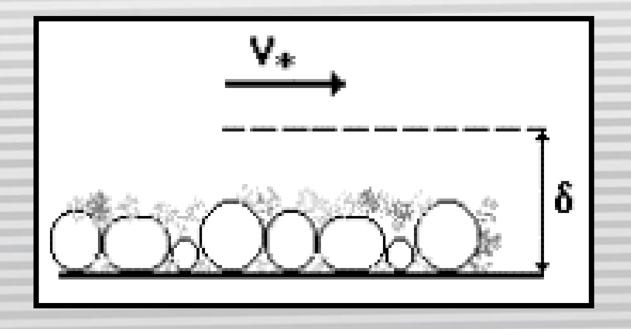


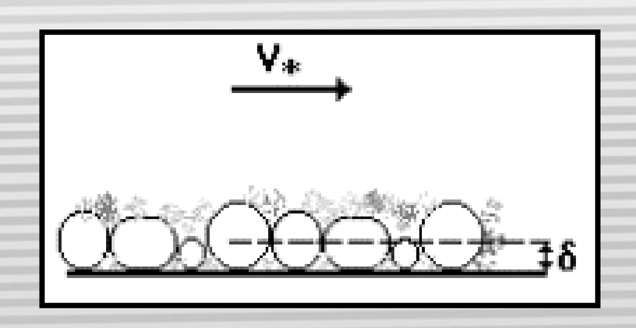
4. PRINCIPIO DE MOVIMIENTO Y TRANSPORTE/CONTINUACIÓN

Re* < 5 : turbulento liso, $\delta > D$ cubre el grano

5 < Re* < 400 : movimiento turbulento intermedio

Re* > 400 : turbulento rugoso, $D > \delta$ (subcapa límite laminar)





$$\delta = \frac{11.6u_*}{\vartheta}$$

- ✓ **Si el grano está dentro de la subcapa laminar (δ), F_D y F_L dependen del cortante viscoso. La rugosidad no es importante.**

- ✓ **Si el grano está fuera de la subcapa laminar (δ), F_D y F_L dependen del Re y de la forma de las partículas.**





5. GASTO FORMATIVO

- Cuando se estudia la estabilidad de un cauce, es indispensable fijar un gasto que represente el **hidrograma anual**.

GASTO FORMATIVO  ***AQUEL ASOCIADO A LA ESTABILIDAD DE UN CAUCE***

Criterios para determinarlo:

a) **Gasto dominante**: aquel que de permanecer constante todo el año, transportará la misma cantidad de material del fondo que el hidrograma anual.

b) **Tr: 1.4 años (*Leopold y Madok*).** Si hay una estación de aforo cercana, se puede obtener analizando gastos máximos con los criterios de Nash o Gumbel.

c) **Otros autores:** considerando ríos de planicie, el gasto máximo que es capaz de pasar por el cauce principal sin que desborde hacia la planicie.



Manual de Diseño de Obras Civiles A.2.11 HIDRÁULICA FLUVIAL





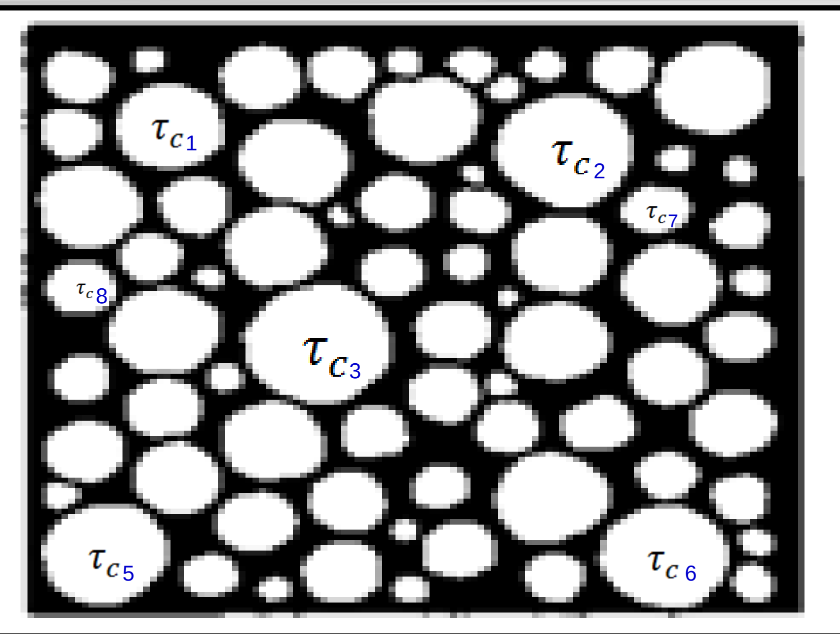
6. ACORAZAMIENTO

- Se presenta en lechos cuyo material es de granulometría extendida – bien distribuidos y principalmente en ríos de grava.

- **Cuando el lecho está constituido por una mezcla de distintos tamaños, cada tamaño obedece a un esfuerzo cortante crítico diferente, de forma que en teoría, la corriente puede desplazar los finos más fácilmente que los gruesos.**

- Este razonamiento puede explicar la existencia de un desplazamiento selectivo de las partículas más finas, que traiga como consecuencia en el tiempo **(a partir de un material originariamente bien mezclado)**, una frecuencia mayor de material grueso en la superficie.

Coraza: barrido o lavado del material más fino





6. ACORAZAMIENTO/CONTINUACIÓN

- El acorazamiento de un lecho influye en la **rugosidad del cauce** pues la superficie del fondo presenta partículas de grano mayor que el medio.

- **También influye en el principio del movimiento del lecho ya que es preciso destruir primero la coraza para poder mover el material más fino que hay debajo.**

CAUCE ACORAZADO – CRECIDAS :

✓ **Crecidas normales: son de “agua clara”, porque encuentran limpia la coraza y el flujo no es capaz de destruirla.**

✓ **Otras: transportan material fino que circunstancialmente puede cubrir la coraza.**

✓ **Crecidas mayores: destruyen la coraza, movilizan el material y remodelan el cauce.**

En procesos de erosión general, el acorazamiento podría suponer un freno.





6. ACORAZAMIENTO/CONTINUACIÓN



7. ESTABILIDAD DE MÁRGENES

Objetivos de la protección de márgenes y cauce:

- ✓ *Estabilización de la orilla cuando presenta erosiones que pueden afectar otros elementos de la ribera : (zonas agrícolas, urbanas, …)*
- ✓ *Protección del fondo del cauce (evitar la erosión generalizada)*





La magnitud y tipo de erosión que se produce en un tramo de cauce natural viene marcada por:

- ❑ **Características del cauce.**
- ❑ **Condiciones medioambientales del lugar.**

"Únicas para cada tramo de río y situación"

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL TIPO Y MAGNITUD DE LA EROSIÓN:

➢ **CONDICIONES DEL FLUJO EN EL CANAL**
- Factor dominante en el proceso de erosión de las márgenes (Q, t)
- 90-99 % de procesos erosivos en márgenes están asociados a episodios de avenidas importantes (FHWA).

➢ **CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES QUE FORMAN EL MARGEN**
- Cohesivos, no cohesivos y estratificados.

➢ **VEGETACIÓN EXISTENTE EN EL MARGEN**
- Efecto de trabazón ejercido por el sistema radicular aumenta resistencia.

➢ **ESTABILIDAD DEL LECHO**
- Socavación del lecho - pérdida de soporte.

▲ LECHO RESISTENTE > CONCENTRACIÓN DE ENERGÍA EROSIVA EN MÁRGENES.

7. ESTABILIDAD DE MÁRGENES/CONTINUACIÓN

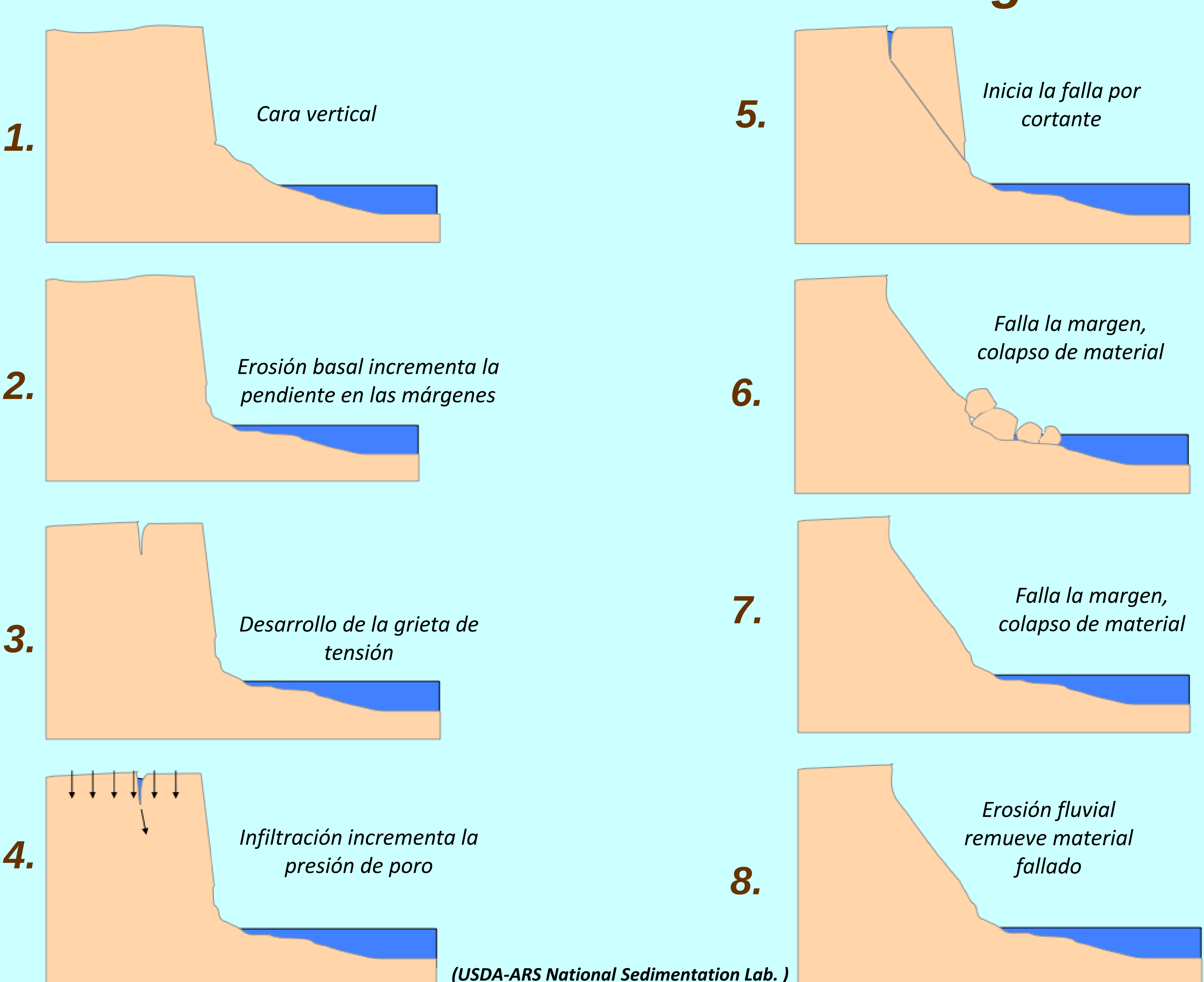
- **Limitar o evitar la erosión.**
  - Cauces restaurados - Proteger la infraestructura cercana - Estabilizar márgenes que migran rapidamente.

- **El aumento de la erosión de las márgenes es típicamente una indicador de un cauce perturbado.**
  - Es necesario comprender estos procesos.

> ➢ **Reto: ¿Cómo reducir las tasas de erosión de las márgenes?**



Proceso de Retroceso de Márgenes



(USDA-ARS National Sedimentation Lab.)

Bis…

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Talud infinito	Rectas	De fuerzas e implícito de momentos	Se analiza un bloque superficial con un determinado espesor y una altura de nivel freático, y se supone una falla parale superficie del terreno.
Bloques o cuñas	Tramos rectos formando una cuña	De fuerzas	Se analiza la falla de cuñas simples, dobles o triples analizando las fuerzas que actúan sobre cada uno de los sectores de la Son útiles para analizar estabilidad de suelos estratificados o mantos de roca.
Espiral logarítmica (Frohlich, 1953)	Espiral logarítmica	De fuerzas y de momentos	Se asume una superficie de falla en espiral logarítmica en el cual el radio de la espiral varía con el ángulo de rotación s centro de la espiral. Es muy útil para analizar estabilidad de taludes reforzados con geomallas o mailing. Se co uno de los mejores métodos para el análisis de taludes homogéneos.
Arco circular (Petterson, 1916), (Fellenius, 1922)	Circulares	De momentos e implícitament e de fuerzas	Se supone un círculo de falla, el cual se analiza como un solo bloque. Se requiere que el suelo sea cohesivo ($\varphi = 0$).
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa de como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La soluc sobredeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de superficie de falla.	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobredeterminada que no sa completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalment
Lowe y Karafiath (1959)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Asume que las fuerzas entre partículas están inclinados a un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las b las dovelas. Esta simplificación deja una serie de incógnitas y no satisface el equilibrio de momentos. Se consi más preciso de los métodos de equilibrio de fuerzas.
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el eq estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una f arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que las magnitudes de las fuerzas verticales siguen un sistema predeterminado. Utiliza el método de las dovel calcular la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla. Esto permite desarrollar una r entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad. El factor de seguridad estático corresponde al caso d coeficiente sísmico. Satisface todas las condiciones de equilibrio; sin embargo, la superficie de falla correspondi muy diferente a la determinada utilizando otros procedimientos más convencionales.
Elementos finitos	Cualquier forma de la	Analiza esfuerzos y	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, per

7. ESTABILIDAD DE MÁRGENES/PROTECCIÓN

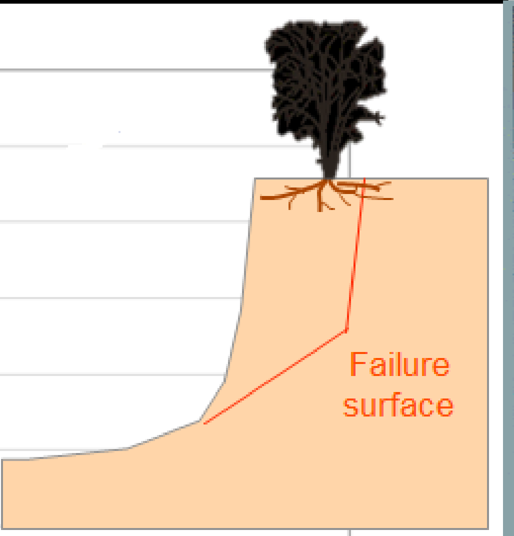
A) Interposición de un elemento entre la orilla y la corriente de agua que evite la erosión *(Estructuras de protección del margen)*:

Revestimientos de la margen – Pantallas - …

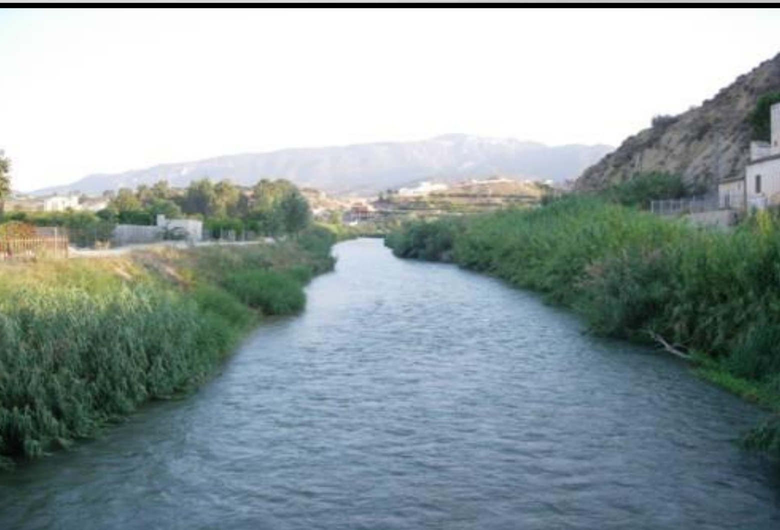
B) Disminución de la capacidad erosiva de la corriente de agua
(Elementos de control del movimiento)

Espigones - Diques longitudinales - …

Importancia de la vegetación en la protección de márgenes :







7. ESTABILIDAD DE MÁRGENES/PROTECCIÓN

Protección de margen flexible – Escollera o Rip Rap

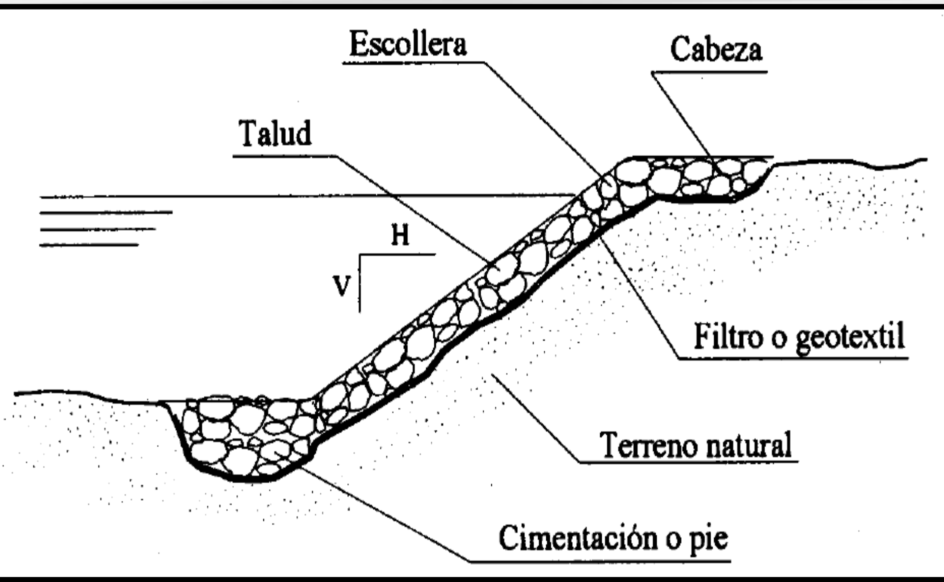




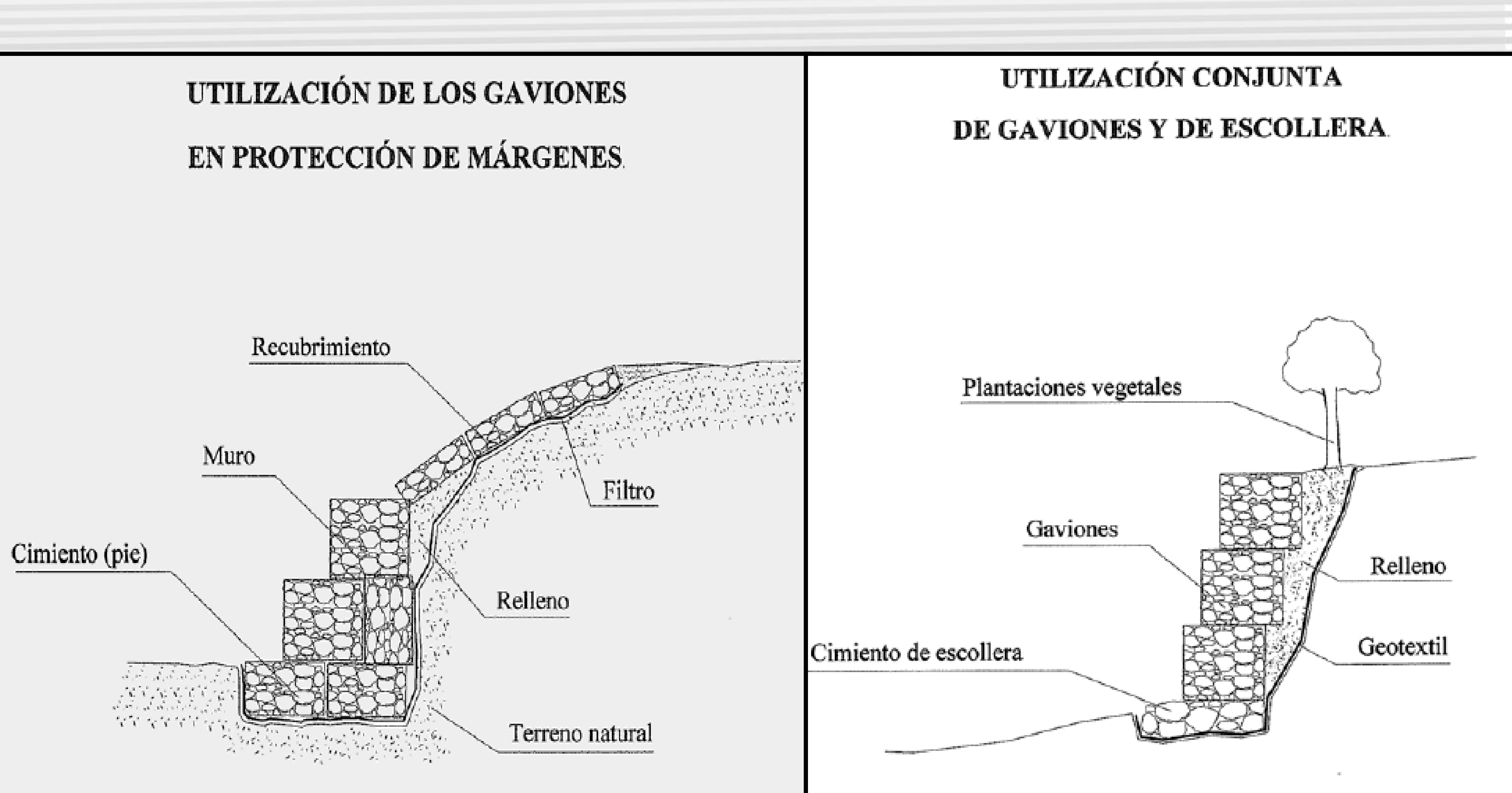
Foto: M.I. Martín Ramírez. Conagua.





7. ESTABILIDAD DE MÁRGENES/PROTECCIÓN

Protección de margen flexible – Gaviones



7. ESTABILIDAD DE MÁRGENES/PROTECCIÓN

Protección de margen rígida - Pantallas

Muro
Riostra
Pilote

Hormigón
Cimiento
Talud perfilado

Hormigón
Mampostería
Lecho del río
Cimentación

Relleno
Hormigón
Cimentación

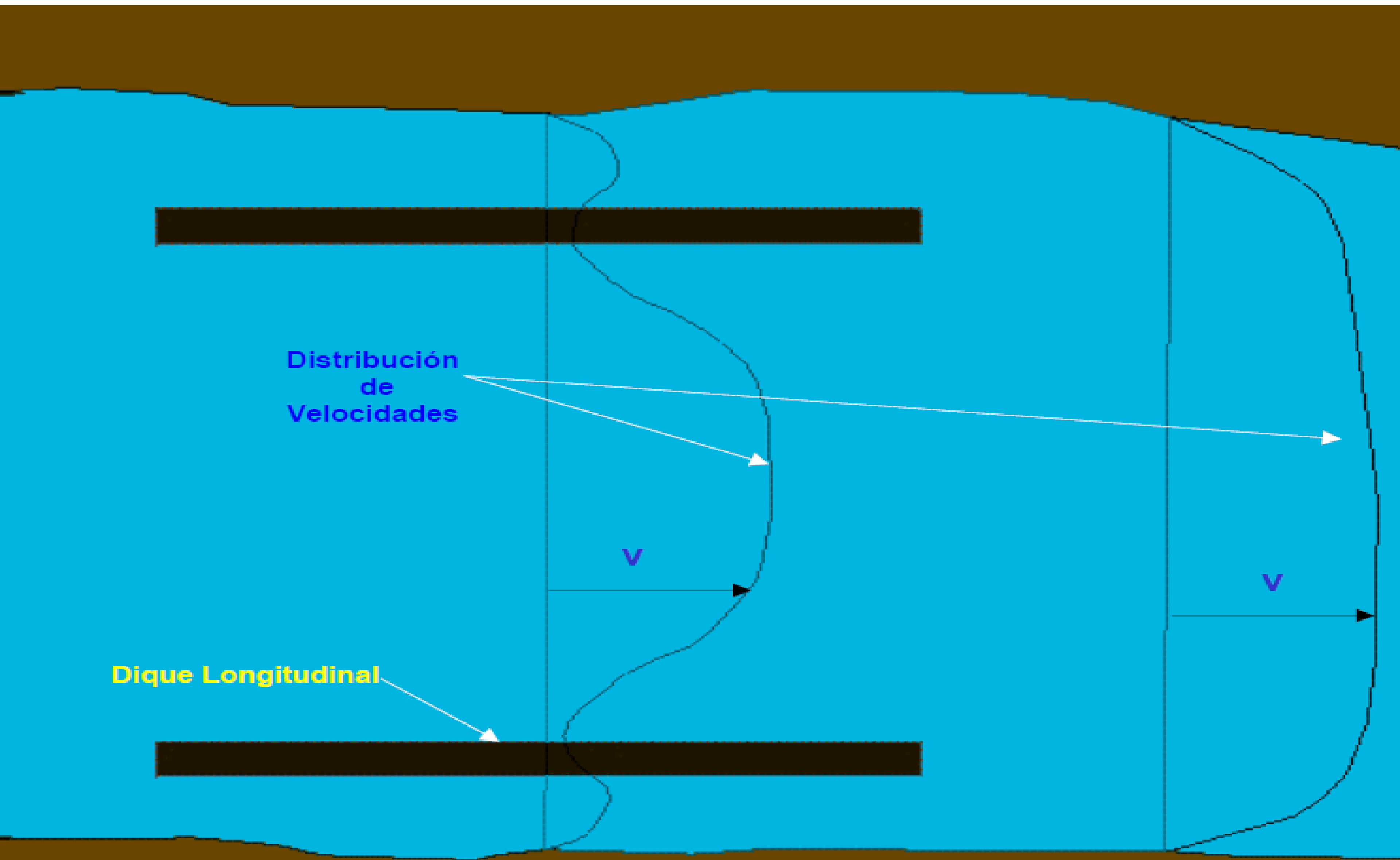




Foto: M.I. Martín Ramírez. Conagua.

7. ESTABILIDAD DE MÁRGENES/PROTECCIÓN

Protección de márgenes - Diques longitudinales
Control del movimiento



7. ESTABILIDAD DE MÁRGENES/PROTECCIÓN

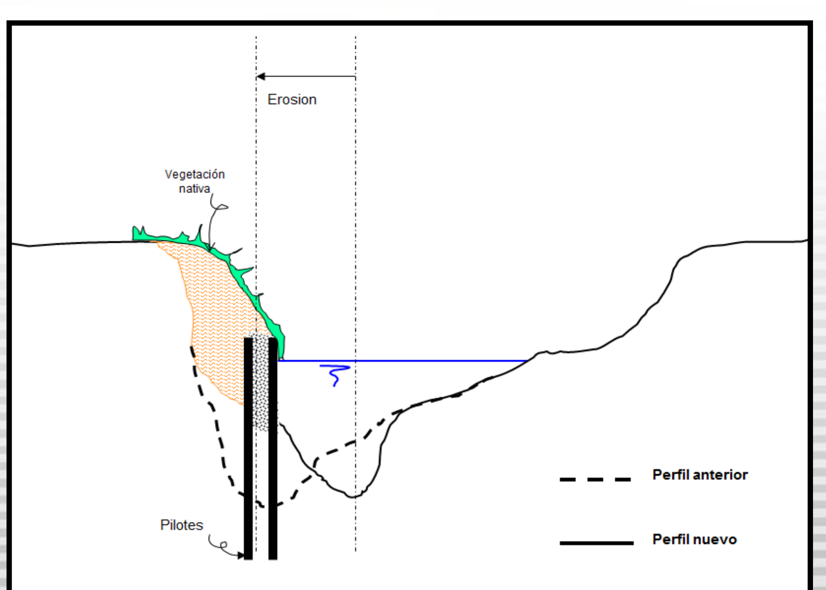
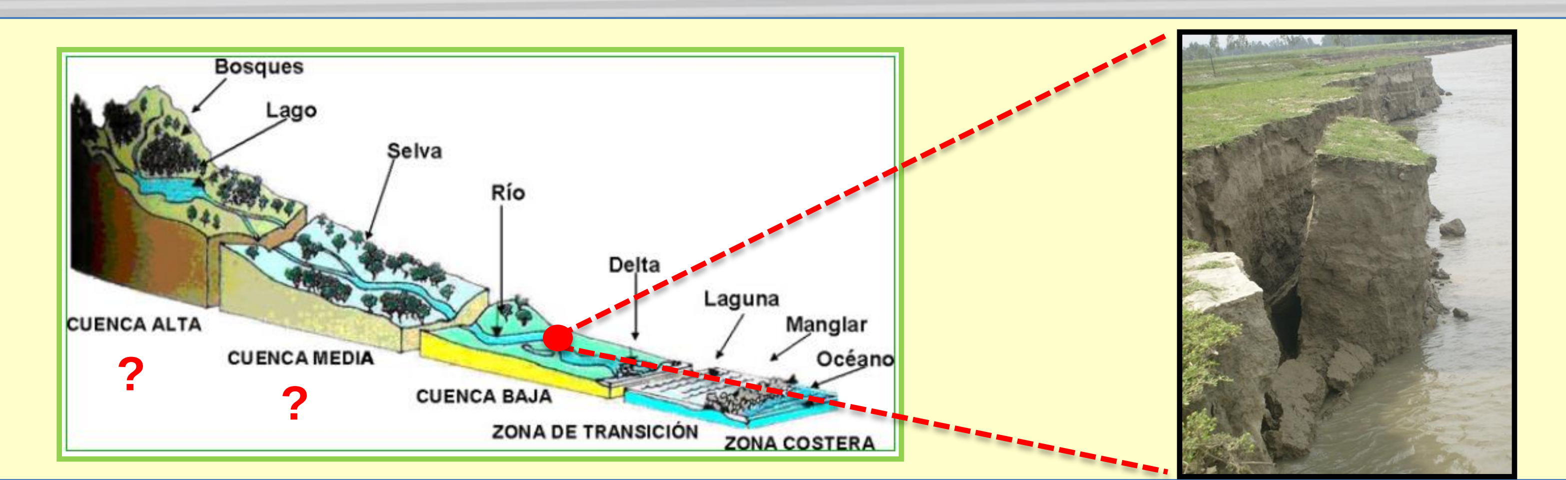


Foto: M.I. Martín Ramírez. Conagua.

REFLEXIONES FINALES



- **La hidráulica fluvial es una disciplina científica compleja, con una tradición empírica.**
- **La toma de decisiones debe involucrar especialistas de distintas disciplinas, dadas las numerosas variables que deben abordarse.**
- **Hacer un cambio de paradigma y considerar obras integrales, combinaciones, que incluyan las cuencas medias y altas.**
- **Dada la relevancia que tiene en nuestro país, debemos fomentar la investigación en este campo.**



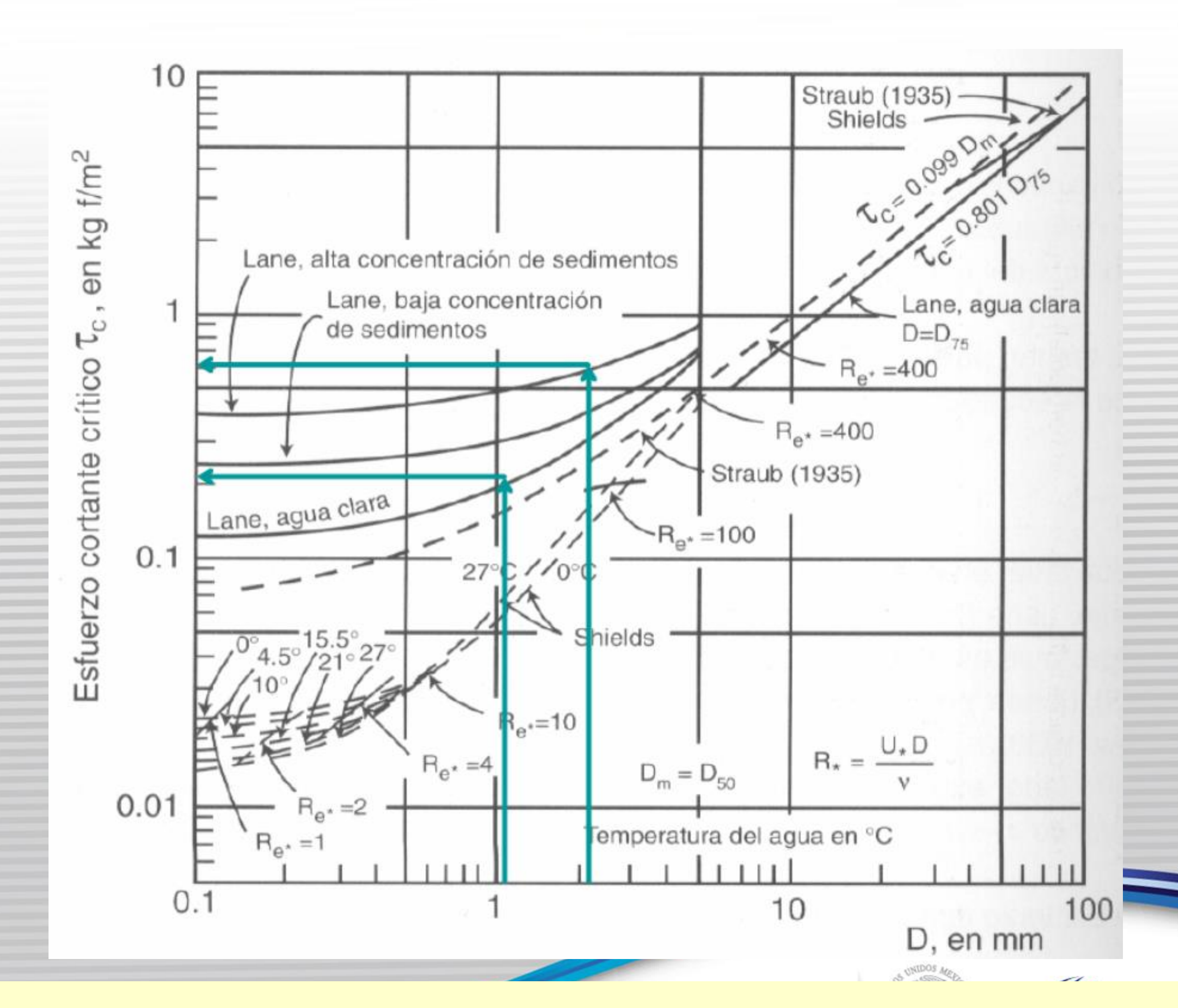
Universidad Nacional
Autónoma de México
UNAM



GRACIAS POR VUESTRA ATENCIÓN !







Henderson, 1996. Maza et al., 1981.

Muy compacto	Compacto	Poco compacto	Suelto

Esfuerzo cortante crítico (fondo plano horizontal), en kg f/m²

5
1.0
0.5
0.1

Arcillo-arenosas (arena < 50%)
Suelos arcillosos
Arcillas
Suelos poco arcillosos

0.2
0.5
1.0
2.5

Relación de vacíos, *e*

Suelos cohesivos. *Bureau of Reclamation*.

$0.750\ \gamma dS$

$0.750\ \gamma dS$

$0.970\ \gamma dS$

Diagrama de esfuerzos en los contornos de un canal.





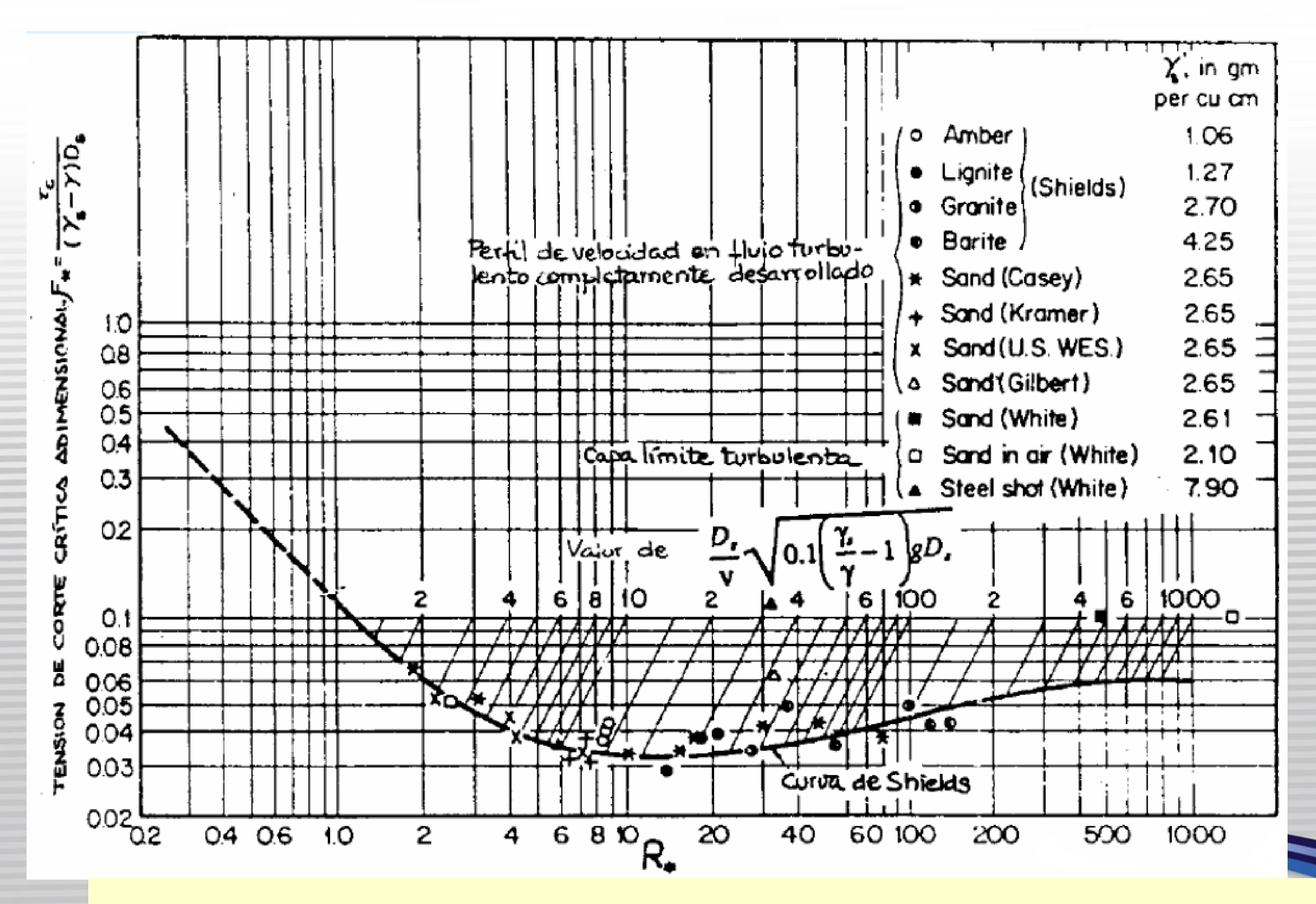


Diagrama de Shields.

MATERIALES NO COHESIVOS

F_w	Peso
F_B	Flotación
F_L	Sustentación
F_D	Arrastre
F_R	Resistente

Flujo

F_B

F_L

F_D

F_R

F_W



